



## ZAVARLJIVOST RAZNOVRSNIH ČELIKA I PRIMJENA SCHAEFFLER-OVOG DIJAGRAMA

### DISSIMILAR STEELS WELDABILITY AND SCHAEFFLERS DIAGRAM APPLICATION

Branko MATEŠA<sup>1)</sup>, Ivan SAMARDŽIĆ<sup>1)</sup>, Marko DUNDER<sup>2)</sup>

**Ključne riječi:** zavarljivost, raznovrsni čelici, Schaeffler-ov dijagram

**Key words:** weldability, dissimilar steels, Schaefflers diagram

**Sažetak:** U radu je iznijet osvrt na zavarivanje raznovrsnih čelika. Analizirani su tehnološki i metalurški zahtjevi glede njihovog zavarivanja. Naglašena je prisutnost određenih poteškoća te istaknute smjernice za moguća rješenja pri zavarivanju raznovrsnih-raznorodnih čelika. Posebno je prikazana primjena Schaeffler-ovog strukturnog dijagrama te prethodna procjena strukture zavara u cilju pravilnog izbora dodatnog materijala, parametara i postupka zavarivanja.

**Abstract:** The paper presents review on dissimilar steel welding. Technological and metallurgical requirements are regarding on welding analyzed. The presence of certain difficulties is emphasized and directives are for possible solution at dissimilar steel welding pointed out. Especially is presented Schaefflers structural diagram application and previous estimation weld structure regarding on correct selection of welding consumable materials as well as welding process parameters.

---

<sup>1)</sup> J. J. Strossmayer University of Osijek, Faculty of Mechanical Engineering in Slavonski Brod, Slavonski Brod, Croatia

<sup>2)</sup> University of Rijeka, Politehnika Department of Philosophy Faculty, Rijeka, Croatia

## 1. UVOD

U postrojenjima procesne kemijske, energetske te nuklearne industrije postoje različiti uvjeti rada opreme koja je izložena bitno različitim razinama mehaničkih i toplinskih napreznja kao i različitom korozivskom okolišu.

Da bi se zadovoljili konstrukcijski i gospodarski zahtjevi u takvim uvjetima rada primjenjuju se različite vrste materijala koje pri ugradnji iziskuju primjenu raznorodnih spojeva. Savremena strojogradnja, a naročito izradba energetskih, kemijskih i postrojenja za preradu nafte primjenjuje najrazličitije kombinacije čelika i drugih metala.

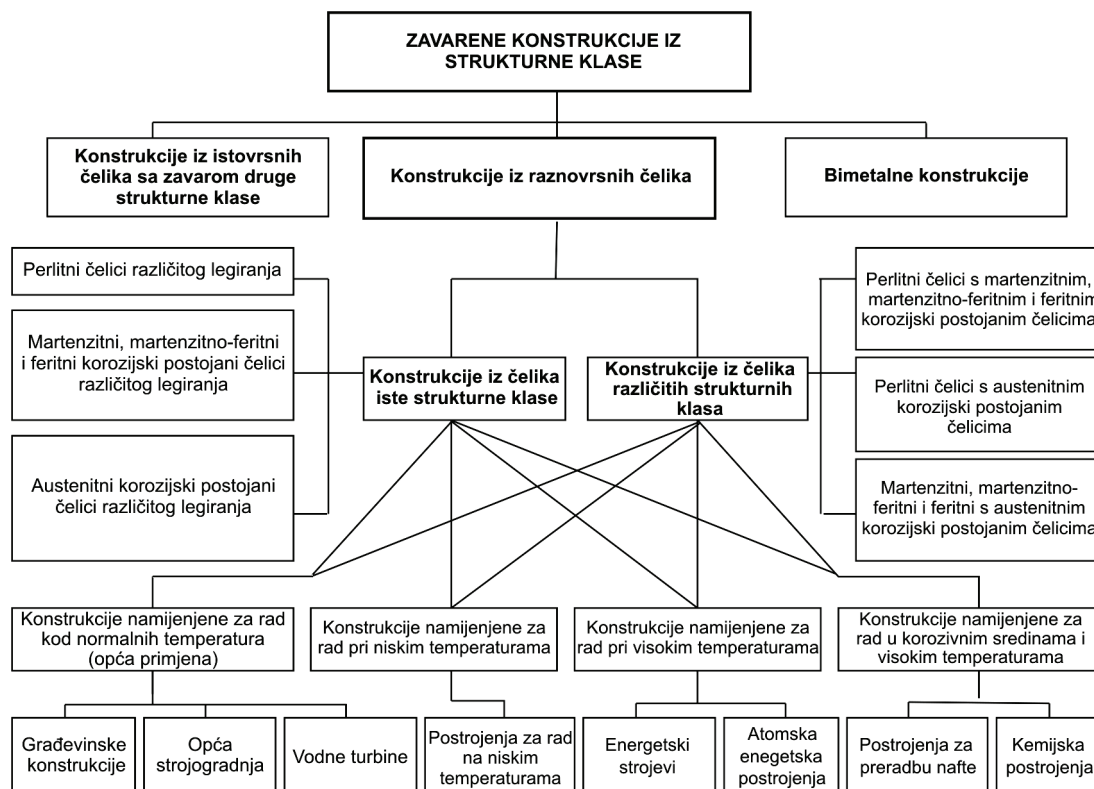
Kako je pri izradbi postrojenja kao i tijekom njihovog održavanja u radu zavarivanje osnovni oblik spajanja posebice je potrebno istaknuti složenost zadaće zavarivanja različitih-raznovrsnih čelika.

Osim zavarivanja prisutno je i navarivanje, oblaganje – platiranje gdje je osnovna ideja osigurati mehaničku otpornost (nosivost) s pomoću jeftinijeg niskougličnog (nelegiranog ili niskolegiranog) čelika, a površinu tog nosivog dijela konstrukcije protiv kemijske agresije nerazdvojivo obložiti – platirati metalnim korozivski postojanim materijalom.

Danas se iz raznovrsnih i platiranih materijala izrađuju reaktori i izmjenjivači topline u kemijskoj industriji, generatori pare i reaktori u energetici i atomskoj tehnici, tlačni spremnici za skladištenje agresivnih kemikalija kao i cjevovodi većih promjera i debljina stjenke.

### 1.1 Klasifikacija zavarenih konstrukcija iz raznovrsnih čelika

Jedna od mogućih klasifikacija zavarenih konstrukcija iz raznovrsnih (raznorodnih) čelika prikazana je na slici 1 [6].



Slika1: Prikaz osnovnih načina podjela zavarenih konstrukcija iz raznovrsnih čelika

Navedene klasifikacije predstavljaju osnovne načine podjele zavarenih konstrukcija iz raznorodnih čelika.

Naravno da je ovisno o posebnostima radnih uvjeta (temperatura, agresivnost okoliša) moguće unutar navedenih grupa provesti i daljnju klasifikaciju.

## 2. TEHNOLOŠKI ZAHTJEVI GLEDE ZAVARIVANJA RAZNOVRNIH ČELIKA

Tehnologija zavarivanja raznorodnih čelika je daleko složenija od one čelika iste strukturne klase. Ova složenost je rezultat zavarivanja čelika različitih strukturnih, mehaničkih i fizikalno-kemijskih svojstava a što se iskazuje kemijskom i strukturnom raznorodnošću unutar zavarenog spoja. Navedeni faktori imaju odlučujuću ulogu pri izboru postupka zavarivanja, tehnike i izbora dodatnog materijala. Odabrana tehnologija također treba smanjiti difuziju ugljika u zoni staljivanja tijekom zavarivanja te moguće toplinske obradbe. Posebnu pažnju kod zavarivanja raznorodnih čelika treba usmjeriti na predgrijavanje osnovnih materijala prije zavarivanja kao i na toplinsku obradbu nakon zavarivanja.

Jedan od osnovnih čimbenika koje treba ocijeniti pri izboru dodatnog materijala za zavarivanje odnosno postupka zavarivanja je stupanj protaljivanja (miješanja). Stupanj protaljivanja ( $\gamma$ ) određuje se kao udio osnovnog metala u sastavu zavara:

$$\gamma = \frac{n}{(n + m)}, \% \quad (1)$$

gdje je:

$n$  – udio protaljenog osnovnog metala u zavaru,

$m$  – udio nataljenog metala u zavaru.

Pri zavarivanju raznovrsnih čelika stupanj protaljivanja (penetracije, miješanja) treba biti što manji pri čemu bi se suzila prijelazna zona te smanjila kemijska raznorodnost.

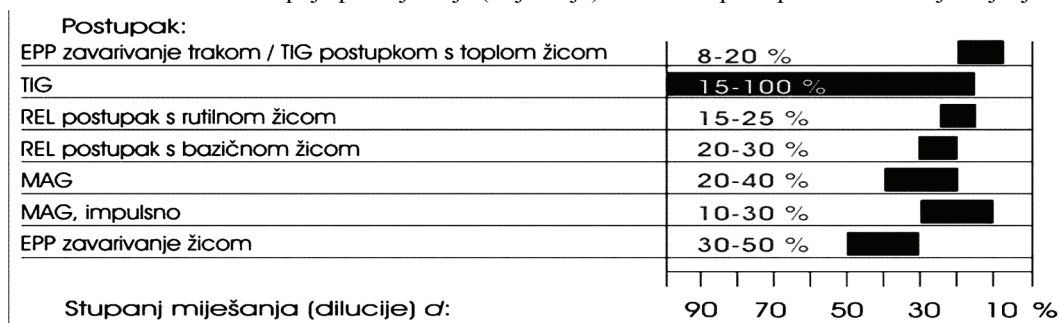
### 2.1 Izbor postupka zavarivanja

U primjenjive postupke zavarivanja za spajanje čelika različitih strukturnih vrsta ubrajaju se:

- postupci zavarivanja taljenjem (REL, MIG, MIG praškom punjenom žicom, EPP, EPP trakom, TIG) s rasponom stupnja miješanja prikazanim u tablici 1.
- postupci zavarivanja taljenjem s vrlo niskim razrjeđenjem – miješanjem metala zavara (postupci s pulsirajućim lukom, zavarivanje elektronskim mlazom, zavarivanje laserom),
- postupci spajanja bez taljenja (zavarivanje trenjem, zavarivanje eksplozijom i difuzijsko spajanje mekim i tvrdim lemljenjem).

Bez obzira na izbor postupka zavarivanja raznorodnih čelika, nužno je odabrati takvu tehnologiju zavarivanja koja jamči malo protaljivanje – miješanje (penetraciju) rastaljenog dodatnog materijala s osnovnim na strani raznorodnog spoja. Ovo je potrebno osigurati kako bi se spriječio nastanak krhkih struktura i posljedičnih pukotina u prijelaznom sloju posebno ako je riječ o zavarivanju austenitnog korozijski postojanog čelika s ugljičnim feritno-perlitnim čelikom.

Tablica 1: Prikaz veličina stupnja protaljivanja (miješanja) kod nekih postupaka zavarivanja taljenjem [9]



## 2.2 Izbor dodatnog materijala

Kakvoća i svojstva zavarenog spoja, a naročito spoja raznovrsnih čelika u velikoj mjeri ovise o izboru dodatnog materijala. Svojstva osnovnih materijala u spoju raznorodnih čelika se znatno razlikuju a što otežava izbor dodatnog materijala. Ovisno o vrsti čelika koji se zavaruje kao i uvjeta rada, dodatni materijal može po svom sastavu biti blizak niže odnosno više legiranom osnovnom materijalu ili se može razlikovati od oba.

Najvažnije je osigurati zadovoljavajuću čvrstoću zavara koja ne bi smjela biti niža od čvrstoće niže legiranog čelika. Pravilan izbor dodatnog materijala treba osigurati minimalno ili potpuno isključenje pojave difuzijskih slojeva krhkih struktura kao i mogućih pukotina. Uglavnom sva stručna literatura za zavarivanje feritno-perlitnih čelika s austenitnim korozijski postojanim čelikom preporučuje primjenu austenitnog dodatnog materijala [2, 6, 8, 9]. Primjenom ovog tipa dodatnog materijala postižu se zadovoljavajuća mehanička i strukturna svojstva zavara. Njegova uporaba s porastom legirajućih elemenata snižava stupanj protaljivanja (penetracije, miješanja).

Pri uporabi feritno-perlitnog dodatnog materijala, na strani austenitnog korozijski postojanog materijala, dolazi do znatno većeg protaljivanja. To se objašnjava nižim talištem kao i nižom toplinskom provodljivošću austenitnog u odnosu na feritno-perlitni čelik. Već kod neznatnog protaljivanja austenitnog čelika u perlitnim zavarima uočava se pojava krhke martenzitne strukture sklone pukotinama tako da se stoga primjena feritno-perlitnog ugljičnog dodatnog materijala pri zavarivanju raznorodnih čelika ne preporučuje.

Prijelazna zona od niskolegiranog materijala prema austenitnom metalu zavara će imati takav sastav koji će uzrokovati stvaranje martenzita. Uporabom dodatnog materijala s osnovom nikla širina martenzitne zone može biti smanjena, što je naročito bitno kod konstrukcija namijenjenih za rad na povišenim i visokim temperaturama.

Bez obzira na potrebu kontrole protaljivanja neki drugi čimbenici bitni za ovu posebnost mogu također utjecati na izbor metala zavara. Ako su npr. tališta čelika koji se zavaruju vrlo različita (što je slučaj s feritno-perlitnim i austenitnim čelikom), temperatura skrućivanja metala zavara treba biti u osnovi bliža onoj od čelika s nižom temperaturom taljenja. U protivnom, ako je temperatura skrućivanja metala zavara bitno premašuje temperaturu skrućivanja jedne komponente moguća je pojava toplih pukotina u zoni utjecaja topline (ZUT) materijala koja se posljednja skrućuje.

Općenito, pri izboru dodatnog materijala kod zavarivanja raznorodnih čelika treba voditi računa kako bi se osigurala tražena struktura zavarenog spoja zadovoljavajućih mehaničkih svojstava, otpornost prema selektivnoj i napetostnoj koroziji, niska osjetljivost na krhkost te otpornost na toplinski zamor.

### 2.3 Zaostala naprezanja (napetosti) zavarenih spojeva i deformacije konstrukcija iz raznovrsnih čelika

Napetosti, kao stanje elastičnih deformacija koje su uravnotežene unutar materijala, mogu nastati u zavarenom spoju raznorodnih čelika:

- u tijeku zavarivanja, uslijed neravnomjerne raspodjele topline (toplinskog polja) pri zavarivanju te krutosti zavarenih elemenata koja sprječava toplinske deformacije tako da nastaju plastične deformacije (za jednoosno stanje naprezanja:  $\sigma = \alpha \cdot E \cdot \Delta T$  (2))
- kod postupka toplinske obradbe,
- u uvjetima rada pri cikličkoj promjeni temperature.

Na nastajanje napetosti utječu i mehanička i fizikalna svojstva čelika koji se zavaruje, kao što su: koeficijent linearnog istezanja, toplinska vodljivost, modul elastičnosti itd. Usporedna svojstva ugljičnog i visokolegiranih čelika prikazana su u tablici 2. Usporedbom koeficijenata linearnog istezanja čelika različite strukturne vrste, uočena je najveća razlika (35 %) između čelika austenitne i feritno-perlitne strukture. Što je veća razlika u koeficijentima linearnog istezanja materijala koji se zavaruju bit će i veći stupanj nastalih napetosti.

Uslijed znatne razlike u koeficijentima linearnog istezanja, pri toplinskoj obradbi radi uklanjanja napetosti dolazi do deformacije konstrukcije i do nastanka novih napetosti. Na nastanak novih napetosti može također utjecati i znatna razlika u vrijednostima modula elastičnosti osnovnog materijala i metala zavara. Tablica 2 Prikaz svojstava različitih vrsta čelika [4].

Tablica 2: Svojstva različitih vrsta čelika [4]

VRSTA ČELIKA SVOJSTVO	Austenitni Cr-Ni čelici	Feritni Cr čelici	Martenzitni Cr čelici	Precipitacijom očvrstivi čelici	Ugljični čelici
Gustoća, $\rho$ /kg m <sup>-3</sup>	7800-8000	7800	7800	7800	7800
Koeficijent linearnog istezanja (0-500 °C), $\alpha/10^{-6}K^{-1}$	17,0-19,2	11,2-12,1	11,6-12,1	11,9	11,7
Koeficijent toplinske vodljivosti (100 °C), $\lambda/W m^{-1}K^{-1}$	18,7-22,8	24,2-26,3	28,7	21,8-23,0	60
Specifični električki otpor /10 <sup>-6</sup> Ωm	69-102	59-67	55-72	77-102	12
Specifični toplinski kapacitet (0-100 °C), $c/J kg^{-1}K^{-1}$	460-500	460-500	420-460	420-460	480
Vlačni modul elastičnosti, $E/GPa$	190-200	200	200	200	210
Područje taljenja /°C	1400-1450	1480-1530	1480-1530	1400-1440	1538

U slučaju kombinacije feritno-perlitnog materijala i austenitnog metala zavara bilježi se razlika od 10 % vrijednosti modula elastičnosti u korist austenitnog metala zavara. Da bi se spriječila pojava pukotina zbog napetosne korozije, raznovrsna konstrukcija izložena korozijskoj sredini treba biti prethodno zavarena s minimalnim napetostima.

Kod zavarenih raznovrsnih spojeva kod kojih su izrazite razlike u koeficijentima linearnog istezanja za vrijeme rada mogu se pojaviti pukotine uslijed toplinskog zamora zbog cikličkih promjena temperature (velike i česte promjene). U tom slučaju preporuča se takav izbor dodatnog materijala čiji je koeficijent linearnog istezanja približno jednak onom kod ugljičnog konstrukcijskog čelika (npr. nikal-legure). U tom slučaju najviša opterećenja će se javljati na strani korozijski postojanog čelika gdje će se zbog više razine duktilnosti materijala ukupna



razina naprezanja sniziti plastičnom deformacijom.

### 3. METALURŠKI ZAHTJEVI GLEDE ZAVARIVANJA RAZNOVRNIH ČELIKA

#### 3.1 Difuzijski procesi

Difuzija kao toplinski aktiviran transport-migracija atoma elemenata kroz materijal te njezine posljedice imaju znatan utjecaj na kakvoću zavarenog spoja raznovrsnih čelika te na njegovu pouzdanost u radu. Proces difuzije su mogući tijekom zavarivanja, toplinske obradbe i rada pri visokim temperaturama.

Protok kroz materijal (masivni polikristalni materijal) provodi se putem različitih oblika difuzije [12]:

- a) gibanje atoma kroz kristalnu rešetku (volumna difuzija),
- b) difuzija po površini ili površinska difuzija,
- c) difuzija duž granica kristala (zrna),
- d) difuzija duž dislokacija i drugih površinskih i linijskih nepravilnosti.

Na visokim temperaturama je osim volumne difuzije zbog smanjenog volumena granica kristala i dislokacija prisutna i difuzija po granicama zrna.

Posljedica difuzije i migracije najpokretljivijih elemenata, prvenstveno ugljika te ostalih karbidotvornih elemenata (Cr, Mo, V) iz materijala s nižim stupnjem legiranja u onaj s višim je stvaranje karbidima bogate zone niske plastičnosti (pougljičenje) u više legiranom materijalu te zone s niskim sadržajem ugljika i niskom čvrstoćom (razugljičenje) u niže legiranom materijalu posebno ako je zavareni spoj podvrgnut povišenoj temperaturi kroz duže vrijeme. Odvojeno od ugljika, dušik i kisik također migriraju prema višelegiranom materijalu tako da ispražnjena zona postaje ekstremno čista. Zbog toga temperatura rekristalizacije pada na vrlo nisku razinu, koja je za feritni čelik na oko 500 °C. Premda ova zona nije jako široka, ona može imati nisku vlačnu čvrstoću i tvrdoću.

Tendencija stvaranja dekarbonizirajuće (razugljičene) zone, zbog veće topljivosti ugljika u austenitu u odnosu na ferit, je snažnija u feritno-austenitnim nego li u svim feritnim spojevima (slika2).

Čine se razni načini u cilju sprečavanja migracije ugljika. Postoji nekoliko rješenja u cilju smanjenja kemijske i strukturne heterogenosti spoja.

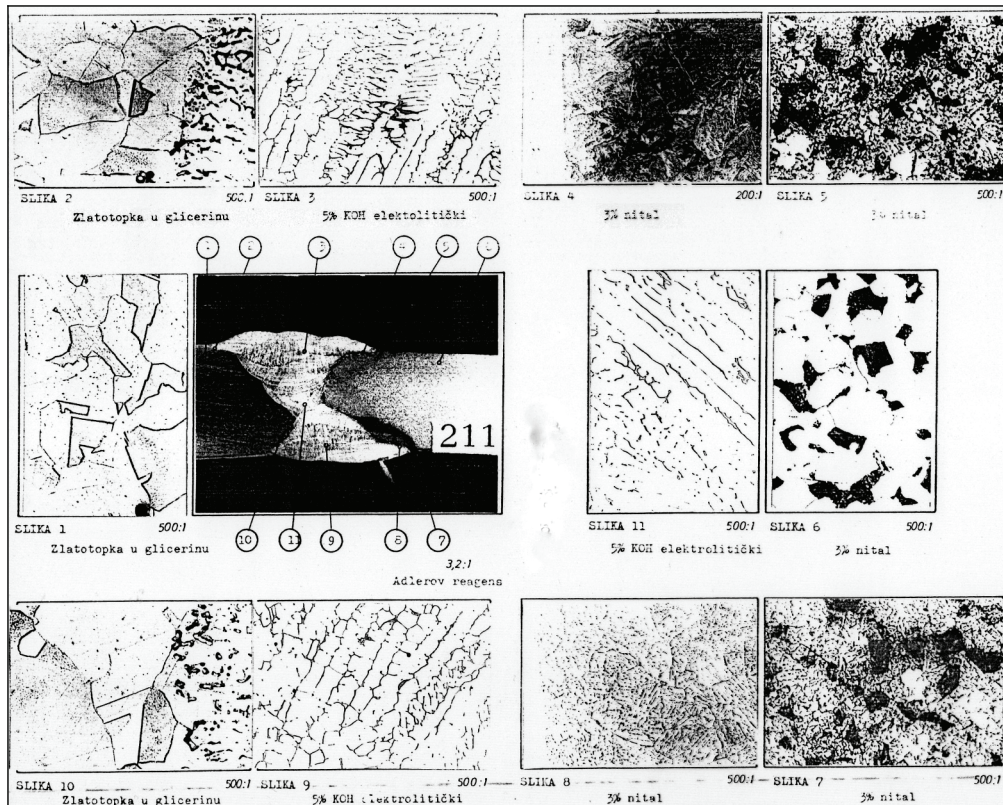
- legiranje ugljičnog čelika elementima koji stvaraju karbide, kao što su Ti i Nb a jači su karbidotvorci od Cr. Prisutnost ovih elemenata u ugljičnom čeliku utječe na vezivanje ugljika u stabilne karbide te se na taj način sprječava njegova difuzija u austenitni materijal.
- oblaganje strane ugljičnog čelika austenitnim materijalom ili uporaba materijal na osnovi nikla (razina difuzije u niklu je niska te je rast razugljičenog sloja ograničen i nakon dužeg izlaganja visokim temperaturama).

Navedena rješenja kod zavarivanja raznovrsnih čelika nisu dovoljno učinkovita posebno kad je riječ o zavarivanju čelika povišene čvrstoće kao i konstrukcija koje su pri radu izložene povišenim temperaturama.

Mehanička svojstva statički opterećenih zavarenih spojeva raznorodnih čelika razugljičenjem nisu snižena ako je radna temperatura spoja ispod 300 °C.

Zbog moguće strukturne i kemijske heterogenosti kao i visokih napetosti toplinske naravi, učinkovito rješenje pri zavarivanju raznovrsnih čelika može biti i primjena prijelaznih dijelova odgovarajućeg presjeka (cijev, ploča, traka, šipka).

Uporaba prijelaznih elemenata je takvo rješenje koje rezultira u zavarivanju čelika jednakih strukturnih klasa.



Slika 2: Prikaz struktura i zone pougljičenja/razugljičenja kod spoja niskolegiranog feritno-perlitnog s austenitnim korozijski postojanim čelikom zavarenog REL postupkom austenitnom elektrodom s molibdenom [10, 11]

### 3.3 Strukturna heterogenost i primjena Schaeffler-ovog dijagrama

Konstruktivna i tehnološka čvrstoća i pouzdanost proizvoda iz raznovrsnih čelika može se osigurati samo ako u području zavarenog spoja nema krhkih međuslojeva.

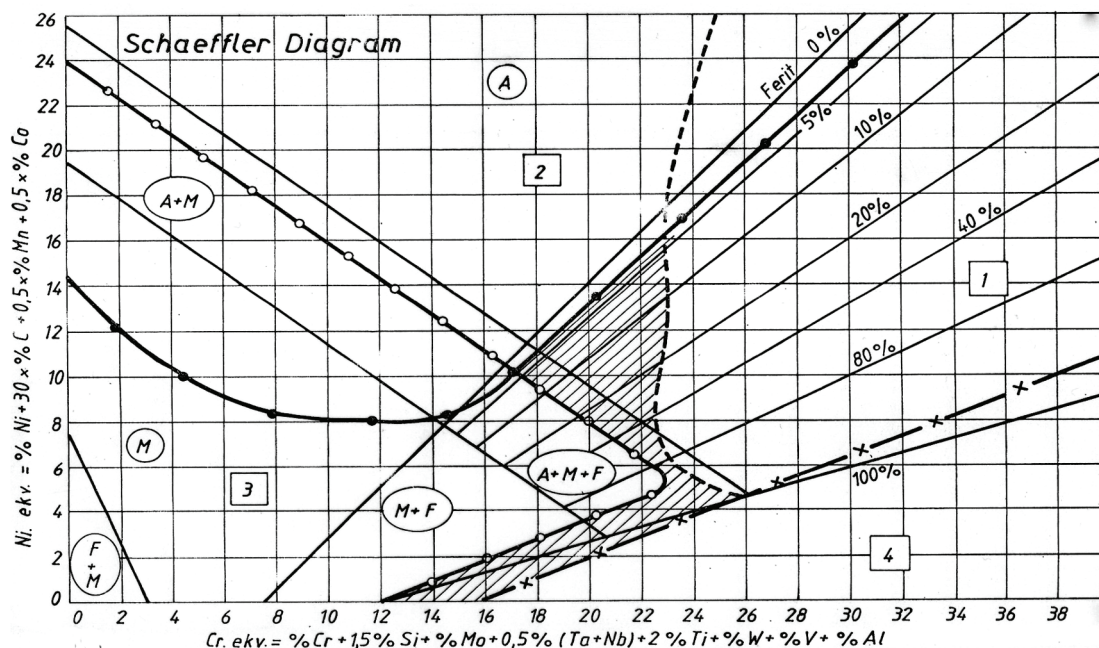
S obzirom na to, neophodno je kod izbora dodatnog materijala i određivanja stupnja protaljivanja osnovnog materijala ispravno procijeniti strukturu i svojstva pojedinih zona spoja. Tako su kod zavarivanja niskolegiranih zakaljivih čelika s austenitnim korozijski postojanim čelicima bitni čimbenici:

- 1) pravilan izbor dodatnog materijala u cilju sprječavanja pojave toplih pukotina u austenitnom materijalu,
- 2) upravljanje procesima difuzije (migracije) elemenata iz niskolegiranog čelika, pretežito ugljika u zonu staljivanja u cilju sprječavanja pojave krhkih međustruktura.

Prvi čimbenik određuje kakvoću dodatnog materijala, a drugi ograničava područje primjene zavarenog spoja raznorodnih čelika.

Za praksu je od posebne važnosti predvidjeti strukturu koja bi nastala u spoju nakon zavarivanja raznovrsnih čelika. Da bi predvidio metaluršku mikrostrukturu čiji nastanak se očekuje, Schaeffler (1949) je razvio strukturni dijagram koji je kasnije dopunio DeLong (slika 3) [1, 13].

Schaeffler je (Cr) ekvivalentom izrazio utjecaj elemenata koji pospješuju stvaranje ferita ( $\alpha$ -geni elementi), a (Ni) ekvivalentom utjecaj elemenata koji podupiru stvaranje austenita ( $\gamma$ -geni elementi).



Slika 3: Schaeffler-ov dijagram dopunjen DeLongom i M. C. T. Bystramom s prikazom područja strukturne osjetljivosti te šrafiranim područjem prihvatljive zavarljivosti

Vrlo je značajna M. C. T. Bystram-ova dopuna Schaeffler-ovog strukturnog dijagrama s četiri linije koje označavaju četiri polja (slika 3). Osnovna strukturna područja u Schaeffler-ovom strukturnom dijagramu su razgraničena pravcima i označena početnim slovima naziva strukture koja nastaje. Osnovni i dodatni materijal koji je u polju (1) na temperaturama 500 – 900 °C sklon je pojavi krhke  $\sigma$ -faze. Među austenitno-feritnim čelicima naročito su skloni krhkosti oni s više od 10 %  $\delta$ -ferita ( $\alpha$ -faze). Materijali koji se prema (Cr)ekv. i (Ni)ekv. nalaze u polju (2) iznad 1250 °C su skloni stvaranju toplih pukotina. Kao što je vidljivo na slici 3 ovo polje obuhvaća uglavnom materijale s austenitnom strukturom pa ukoliko se zavaruju s čisto austenitnim dodatnim materijalom moguća je pojava toplih pukotina.

Rješenje je u zavarivanju ovih čelika s dodatnim materijalom koji u strukturi metala zavarava osigurava 3 – 10 % ferita.

U polju (3) se nalaze zavareni spojevi s krhkom martenzitno-austenitnom i martenzitno-feritnom strukturom te su izrazito skloni pojavi hladnih pukotina (ispod 400 °C). Moguće rješenje problema je u predgrijavanju i naknadnoj toplinskoj obradbi žarenjem. Polje (4) obuhvaća korozijski postojeće čelike s vrlo malim sadržajem ugljika. Pri temperaturi iznad 1100 °C izrazit je rast zrna što rezultira sklonošću pojavi pukotina u zavaru i zoni utjecaja topline (ZUT).

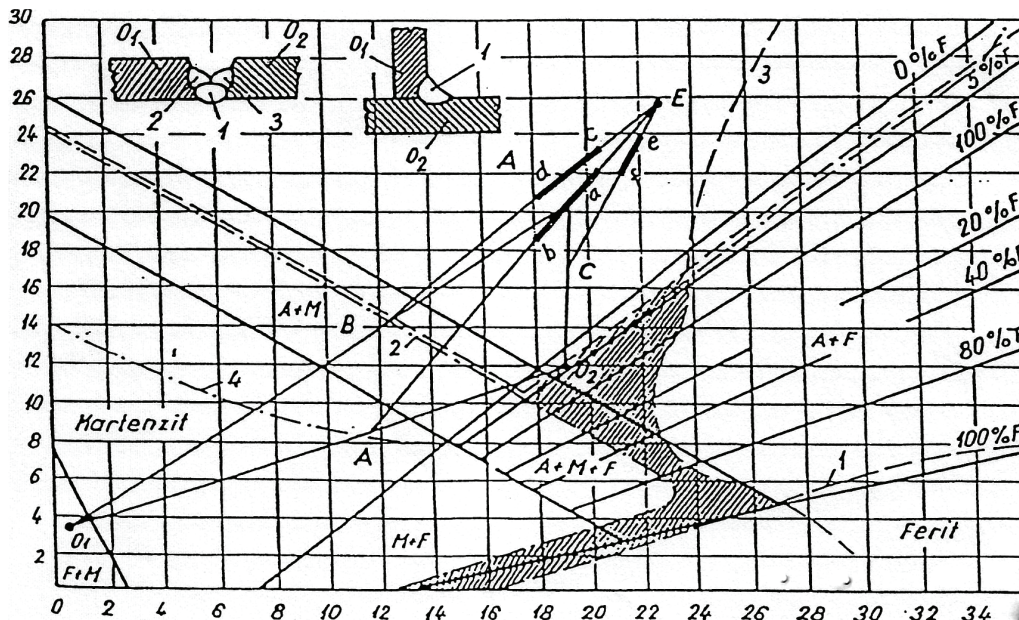
Šrafirano područje u dijagramu predstavlja područje optimalnog sastava zavarenog spoja te dobre zavarljivosti.

Određena kakvoća čelika, čiji se kemijski sastav kreće u normiranim granicama, može se u Schaeffler-ovom dijagramu prikazati omeđenim područjem koje određuje mogući položaj čelika konkretnog sastava. Čelik određenog sastava kao i nanaseni dodatni metal (navar ili čisti zavar) određeni su u dijagramu točkom čiji je položaj definiran njihovim Cr- i Ni-ekvivalentom (slika 4).

Strukturno stanje zavarenog spoja može se pratiti na dužini koja spaja točke osnovnog i dodatnog metala. Podijelivši dužine u postotne dijelove može se u razmatranje unijeti čimbenik stupnja protaljivanja (penetracije, miješanja) s osnovnim metalom. Ako je npr. stupanj



protaljivanja osnovnog kod ručnog elektro-lučnog zavarivanja (REL) 20 – 40 %, vrijednosti se mogu unijeti u dijagram (podebljana crta – odsječak a-b na dužini O1-E slike 4).



Slika 4: Prikaz primjene Schaeffler-ovog strukturnog dijagrama pri prethodnom određivanju kemijske i strukturne heterogenosti slojeva zavara

U korijenskom sloju (1) srednji sastav rastaljenih ivica lima odgovarat će točki A na dužini O1-O2. Protaljivanje je kod austenitnog čelika (O2) veće nego kod feritno-perlitnog čelika (O1) zbog niže toplinske provodljivosti austenitnog čelika te je stupanj protaljivanja za niskolegirani oko 40 % a za austenitni čelik oko 60 %. Sastav i struktura korijenskog sloja (1) određeni su odsječkom a-b na dužini AE. Odsječak c-d određuje sastav metala sloja (2) koji nastaje protaljivanjem niskolegirano feritno-perlitnog čelika i korijenskog sloja (1).

Dužina BE određena je na jednak način kao i dužina AE. Sloj (3) određen je odsječkom e-f na dužini CE, koji nastaje protaljivanjem austenitnog čelika i korijenskog sloja (1).

Veći broj istraživača je u cilju povećanja točnosti primjene Schaefflerovog dijagrama nastojao utvrditi utjecaj alfa-genih i gama-genih elemenata kroz izračun  $Cr_{eq}$  i  $Ni_{eq}$  (tablica 3).

Siewert/McCowan/Olsen objavljuju 1988. WRC dijagram koji predstavlja unaprjeđenje Schaeffler-ovog dijagrama. WRC dijagram preciznije određuje sadržaj alfa-faze (tzv. feritni broj FN). Kotecki i Siewert su 1992., dopunili WRC dijagram unoseći utjecaj bakra. Bakar je dodan Ni-ekv. s množiteljem 0,25 (slika 5).

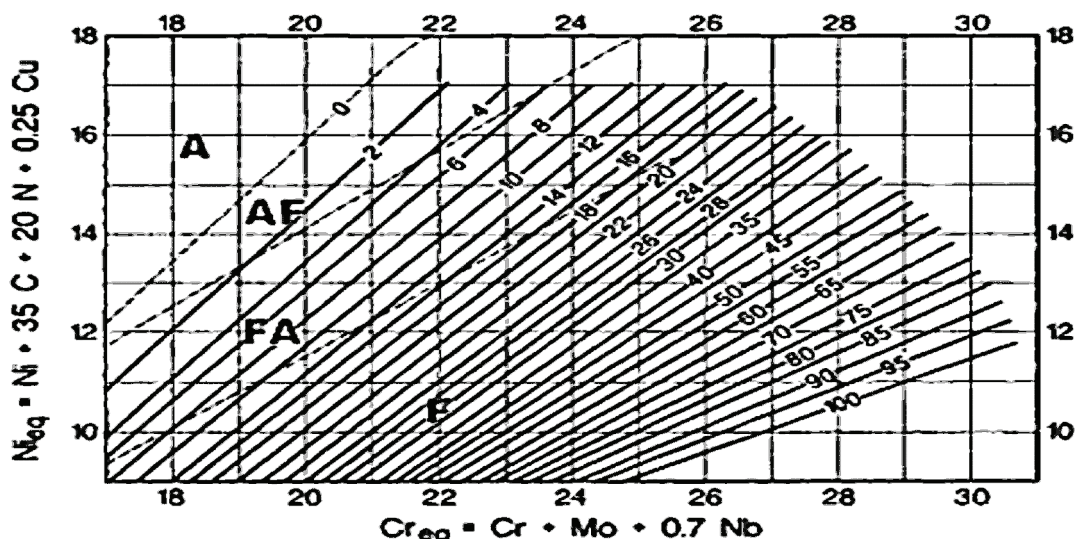
Glavne značajke WRC dijagrama su:

- drugačiji udjeli za neke elemente pri izračunavanju Cr- i Ni- ekvivalenta,
- preciznije određivanje ferita (0 – 100 FN),
- dijagram je primjenjiv za čelike sastava max. 10 %Mn, 3 %Mo, 0,2 %N i 1 %Si,
- dijagram vrijedi za područje (prozor) 17 – 31 %Cr-ekv. i 9 – 18 % Ni-ekv.,
- dijagram je puno precizniji nego Schaeffler-ov i De Long-ov strukturni dijagram.

Kako je izvorno WRC dijagram namijenjen za područje povećanog Cr-ekv. i Ni-ekv. potrebno ga je ugraditi u postojeći Schaeffler-ov strukturni dijagram kako bi bilo moguće provoditi analizu.

Tablica 3: Pregled mogućih izračuna za  $Cr_{eq}$  i  $Ni_{eq}$

Autor	God.	$Cr_{eq}$ , %	$Ni_{eq}$ , %
Schaeffler [12]	1949.	$Cr + Mo + 1,5Si + 0,5Nb$	$Ni + 0,5Mn + 30C$
DeLong et al. [1]	1956.	$Cr + Mo + 1,5Si + 0,5 Nb$	$Ni + 0,5Mn + 30C + 30N$
Hull [5]	1973.	$Cr + 1,21Mo + 0,48Si + 0,14Nb + 2,27V + 0,72W + 2,20Ti + 0,21Ta + 2,48Al$	$Ni + (0,11Mn - 0,0086Mn^2) + 24,5C + 14,2N + 0,41Co + 0,44Cu$
Hammar and Svenson [3]	1979.	$Cr + 1,37Mo + 1,5Si + 2Nb + 3Ti$	$Ni + 0,31Mn + 22C + 14,2N + Cu$
Siewert and Kotecki [7] (WRC-1992)	1992.	$Cr + Mo + 0,7Nb$	$Ni + 35C + 20N + 0,25Cu$



Slika 5: WRC1992 dijagram [7]

#### 4. ZAKLJUČAK

Zadovoljavajuća zavarljivost raznovrsnih čelika je s obzirom na različitost kako osnovnog tako i dodatnog materijala izrazito zahtjevna zadaća. Uz konstrukcijske zahtjeve posebno treba istaknuti tehnološke kao i metalurške zahtjeve pri izvedbi takvih spojeva postupcima zavarivanja taljenjem. Pri svim aktivnostima trebamo imati na umu potrebu niskog unosa topline – niskog stupnja miješanja kao i smanjenje difuzije atoma karbidotvornih elemenata te zavarivanje s minimalnim napetostima. Posebno područje zanimanja bi trebalo biti toplinska obradba zavarenih spojeva raznovrsnih čelika. Ispravnim izborom dodatnog materijala za zavarivanje, postupka zavarivanja i uporabom Schaeffler-ovog i WRC1992 strukturnog dijagrama moguće je smanjiti sklonost otvrdnjavanju, krhkosti i pukotinama. Naravno i dalje su prisutni izazovi ponašanja raznovrsnih spojeva u radu kao što su napetosna korozija i zamor.



## 5. LITERATURA

- [1] DeLong, W. T., G. A. Osram, G. A., Szumachowski, E. R. "Measurement and Calculation of Ferrite in Stainless Steel Weld Metal", *Welding Journal*, Vol 35, Nov. 1956, pp. 521s-528s.
- [2] Folkhard, E., Pertender, E., Schabereiter, H., Toesch, J. "Metallurgie der Schweissung nichtrostender Staehle", Springer Verlag, Wien 1984.
- [3] Hammar, O., Svensson, U. "Influence of Steel Composition on Segregation and Microstructure During Solidification of Austenitic Stainless Steels", *Solidification and Casting of Metals*, The Metals Society, London, pp. 401-410, 1979.
- [4] Hrivnak, I. "Theory of weldability of metals and alloys", *Materials science monography 74*, Elsevier, 1992.
- [5] Hull, F.C., "Effect of Delta Ferrite on the Hot Cracking of Stainless Steel", *Welding Journal*, 46, Sept. 1967., pp. 399s-409s.
- [6] Jakšić, S. "O zavarivanju raznorodnih čelika", *Zavarivanje*, 1, Zagreb, 1969, str. 2-12.
- [7] Kotecki, D. J. T. A. Siewert, "WRC-1992 Constitution Diagram for Stainless Steel Weld Metals: A Modification of the WRC-1988 Diagram", *Welding Research Supplement*, May 1992., pp. 171s-177s.
- [8] Kralj, S.; Andrić, Š. "Osnove zavarivačkih i srodnih postupaka", FSB, Zagreb, 1992.
- [9] Lukačević, Z. "Zavarivanje", SF, Slavonski Brod, 1998.
- [10] Mateša, B. "Istraživanje utjecaja parametara žarenja na strukturna svojstva ručno elektrolučno zavarenog spoja raznorodnih čelika - I. dio", *Zavarivanje*, 34, 1991, svibanj-kolovoz 3/4, str. 67-75.
- [11] Mateša, B. "Istraživanje utjecaja parametara žarenja na strukturna svojstva ručno elektrolučno zavarenog spoja raznorodnih čelika – II. dio", *Zavarivanje*, 35, broj 1, veljača 1992., str. 5-13.
- [12] Novosel, M., Krumes, D. "Posebni čelici", SF, Slavonski Brod, 1998.
- [13] Schaeffler, A. L. "Constitution Diagram of Stainless Steel Weld Metal", *Metal Progress*, 56, November 1949., pp. 680-680B.